

Adam Lukáš

Stanovení řezných parametrů pro technologie vodního paprsku

Determination of Cutting Parameters for Water Jet Technology

Bakalářská práce

Vedoucí práce:

prof. Ing.et Ing. Mgr. Jana Petrů Ph.D.

Ostrava 2021

Bibliografický záznam:

Autor: Adam Lukáš, LUK0128

Název práce: Stanovení řezných parametrů pro technologii vodního paprsku

Studijní program: B2341 Strojírenství

Vedoucí práce: prof. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

Počet stran: 46

Klíčová slova: hydroabrazivní paprsek, Hardox 500, kvalita řezu, řezné parametry

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

LUKÁŠ, A. *Stanovení řezných parametrů pro technologii vodního paprsku: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojní metrologie, 2021, 46 s. Vedoucí práce: prof. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Tato bakalářská práce se zabývá technologií vysokotlakého hydroabrazivního paprsku. V úvodu práce jsou shrnuty základní informace o této technologii a její princip. V rešerši na základě Ishikawova diagramu jsou řešeny hlavní parametry, které ovlivňují kvalitu a přesnost řezu; dále se pak rešerše zabývá normou ČSN EN ISO 17658, která hodnotí vady vznikající při řezání. Druhý bod navrhuje experiment a popisuje, jaký materiál se bude řezat, na jakém stroji a jaké budou řezné podmínky. V bodě experimentální činnosti je popsán postup od programování, přes ustavení polotovaru, až k samotnému řezání. A nakonec ve čtvrtém bodě je řešen hlavní cíl, a to je vyhodnocení parametrů drsnosti.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

LUKÁŠ, A. *Determination of Cutting Parameters for Water Jet Technology: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2021, 46 s. Thesis head: prof. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Bachelor thesis deals with the technology of high pressure hydroabrasive jet. The introduction summarizes basic information and principles of the technology. The part of research, based on Ishikawa diagram, analyzes main parameters which affect the quality and the precision of the cut; the part of research incorporates international standard ČSN EN ISO 1758 which defines terms of possible imperfections originating from cutting. The second article is focused on the plan of the experiment and defines the cut material, cutting machine and cutting conditions. The article of experimental operation describes the procedure of the experiment: the programming, the locating of the semi-product and the cutting. The main goal of the thesis is the evaluation of roughness parameters in the forth and the last article.

Obsah

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	3
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	4
0. Úvod.....	6
1. Rešerše k tématu stanovení řezných parametrů u aplikací vodního paprsku.....	7
1.1. Historie vodního paprsku.....	7
1.2. Schéma vodního paprsku.....	8
1.3. Hlavní parametry.....	9
1.3.1 Hydraulické faktory.....	9
1.3.1.1 Vysokotlaká čerpadla.....	10
1.3.2 Abrazivní faktory.....	13
1.3.3 Technologické faktory.....	14
1.3.3.1 Přesnost polohování.....	15
1.3.3.2 Vliv řezné rychlosti na kvalitu řezu.....	16
1.4. Výsledná kvalita řezu.....	16
1.4.1 Terminologie vad při řezání.....	18
1.4.1.1 Popis vybraných nedostatků kvality řezu podle normy.....	19
Nedostatky na řezných plochách.....	19
2. Návrh experimentální činnosti.....	24
2.1. Náskres řezu – strategie.....	24
2.2. Experimentální materiál – Hardox 500.....	25
2.2.1 Mechanické vlastnosti a chemické složení.....	26
2.3. Stroj.....	27
2.4. Použité abrazivo - granát, MESH 80.....	28
3. Provedení experimentální činnosti.....	30
4. Hodnocení kvality řezu.....	33
4.1. Optický mikroskop.....	35
4.2. Naměřené hodnoty na řezaném profilu.....	36
4.2.1 Analýza dat naměřených hodnot.....	38
5. Zhodnocení výsledků naměřených dat.....	40
Závěr.....	40
6. Seznam použitých zdrojů.....	42
Přílohy.....	46

Seznam použitých zkratk a symbolů

Q1 – Q5		označení jakosti povrchu pro vodní paprsek
Rz	[μm]	největší výška profilu povrchu
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka povrchu
MESH		mezinárodní jednotka zrnitosti abrazivních materiálů
CNC		computer numeric control
3D		trojrozměrný obraz
2D		dvourozměrná podpora projektování
HBW		tvrdost dle Brinella
S(x)	[μm]	výběrová směrodatná odchylka x
\bar{x}	[μm]	aritmetický průměr x
max	[μm]	maximální naměřená hodnota daného parametru drsnosti
min	[μm]	minimální naměřená hodnota daného parametru drsnosti
P	[bar]	tlak
v_c	[m/s]	charakteristická rychlost
C	[-]	uhlík
Si	[-]	křemík
Mn	[-]	mangan
P	[-]	fosfor
Cr	[-]	chrom
Ni	[-]	nikl
Mo	[-]	molybden
B	[-]	bor
S	[-]	síra

0. Úvod

Téma vysokotlakého hydroabrazivního paprsku bylo zvoleno z důvodu, že se jedná o nekonvenční technologii, která jak v minulých letech tak v současnosti zaznamenává velký technický rozvoj, ať už co se týče zvyšování pracovních tlaků čerpadel nebo ve zdokonalování řezacích stolů. Naprosto bezkonkurenční je univerzálnost této technologie v porovnání například se stroji řezajícími laserem, neboť vodní paprsek dokáže řezat obrovskou škálu materiálů při minimálních hodnotách vneseného tepla.

Cílem práce je rozebrání parametrů ovlivňujících kvalitu a přesnost řezání, dále pak vysvětlení mechanismu úběru materiálu a hodnocení vad vzniklých při řezání. V neposlední řadě řezání vzorku z materiálu Hardox 500 a vyhodnocení naměřené drsnosti.

V rešerši je zmíněna historie této technologie a samotný počátek jejího využívání, kdy ji v 19. století využívali kalifornští zlatokopové k odstraňování nánosů písku. Podrobněji jsou rozebrány parametry, které ovlivňují kvalitu a přesnost řezů, zároveň však také samotný mechanismus vzniku hydroabrazivního paprsku. Do kapaliny, sloužící především jako médium přenášející energii a vystupující vysokou rychlostí z primární dýzy, je přiměšováno abrazivo a po výstupu ze sekundární trysky vzniká nástroj, kterým je možné řezat či jinak obrábět různé druhy materiálů. Mechanismus úběru materiálu je založen na uvolňování kinetické energie vody a abraziva třením o obrobek a tím způsobené erozi, přičemž uvolněný materiál je i s již zdeformovaným abrazivem vymýván kontinuálně pohybujícím se proudem hydroabrazivního vodního paprsku. Možné vady řezu jsou vybrány z normy ČSN EN ISO 17658 a jsou blíže popsány, jedná se především o odchylku úhlu řezu a žlábkování vznikající ve spodní části řezu při dělicích rychlostech.

V návrhu experimentální činnosti je navržen materiál Hardox 500, ze kterého byl řezán vzorek a je zde také uvedeno chemické složení a mechanické vlastnosti tohoto materiálu. Dále pak je uveden stroj, na kterém řezání probíhalo.

Cílem experimentální činnosti, založené na řezání vzorku pro Katedru obrábění a strojírenské metrologie z materiálu Hardox 500 a o tloušťce 8mm na vodním paprsku firmy PTV řady Cobra a následném měření drsnosti pomocí optického mikroskopu Alicona Infinite Focus G na vybraných místech vzorku, je analýza dat a následné zhodnocení, kde jsou popsány možné příčiny rozdílů hodnot naměřené drsnosti.

1. Rešerše k tématu stanovení řezných parametrů u aplikací vodního paprsku

1.1. Historie vodního paprsku

Řezání vodním paprskem bylo známé již v poměrně daleké minulosti, neboť zmínky o prvotním užití technologie vodního paprsku pochází již z 19. století, konkrétně okolo roku 1870 z kalifornské oblasti, kde byla užívána tamními zlatokopy, kteří s její pomocí odstraňovali nánosy písku a vrstvy kamení. Jednalo se ovšem o nízkotlaké systémy. [1]

Ve 20. letech 19. století, považovaných za počátek používání vodních trysek, byla metoda používána v praxi během stavebních činností pro odstranění písku a hornin. Trysky se vyznačovaly velkou rychlostí toku s tlakovou úrovní pohybující se mezi desítkami až stovkami barů. [1]

Užívání vodního paprsku však probíhalo i na evropském kontinentu a rozvojem a uplatněním hydromonitorů, nebo-li vodních děl, se ve 30. letech zabýval Petr Tupitsyn na území Ukrajiny při těžbě doněckého uhlí a roku 1936 začal aplikovat vodní proud při řezání děr uhelných slojí. První patent na světě pro použití vodního paprsku byl tedy vystaven v sovětském Rusku. [1]

V letech 1950 – 1960 při těžbě uranu byl vodní paprsek používán jako nástroj pro minimalizování rizika záření s touto těžbou spojeného, což podpořilo další vývoj technologického užití vodního paprsku jako vysokotlakého tryskového řezného nástroje. [1]

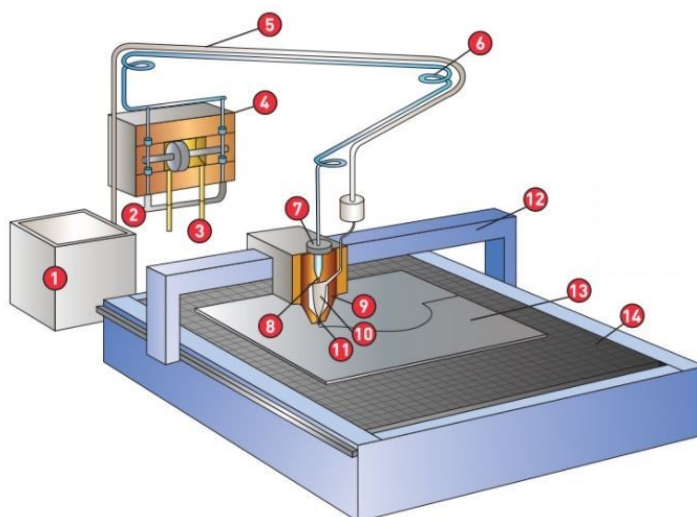
V 50. letech 20. století probíhala řada experimentů a výzkumů zaměřených na řezání vodním paprskem. Inženýr lesního hospodářství Dr. Norman Franz byl prvním člověkem, který se systematicky věnoval užití velmi vysokého tlaku vody. Jednalo se o podmínku UHP, nebo-li ultrahighpressure, Franzem definovanou jako tlak větší než 30 000 liber na palec čtvereční. Počátkem 60. let již dokázal Dr. Franz získat krátkodobé výbuchy vysokého tlaku, které mnohonásobně přesahovaly aktuální hodnoty tlaku a později se ve svých výzkumech věnoval kontinuálnímu proudu. [1]

Ke skutečně širokému užití metody však došlo až v 70. letech 20. století, protože se tehdy začala do vodního paprsku přidávat abraziva, o což se zasloužil Dr. Mohamed Hashish. Toto zdokonalení umožnilo používat paprsek i při řezání materiálů s vyšší pevností a větší tloušťkou. [1]

1.2. Schéma vodního paprsku

Řezání vodním paprskem spočívá v hydroabrazivní dezintegraci částic materiálu, v důsledku dopadu úzkého vodního proudu s velkou kinetickou energií a tlakem na jednotku povrchu materiálu obrobku. Hodnoty pracovního tlaku se pohybují mezi 800 – 6 200 bar a zdrojem jsou vysokotlaká čerpadla. [2]

Obrázek 1.1 - Schéma systému vodního paprsku [3]

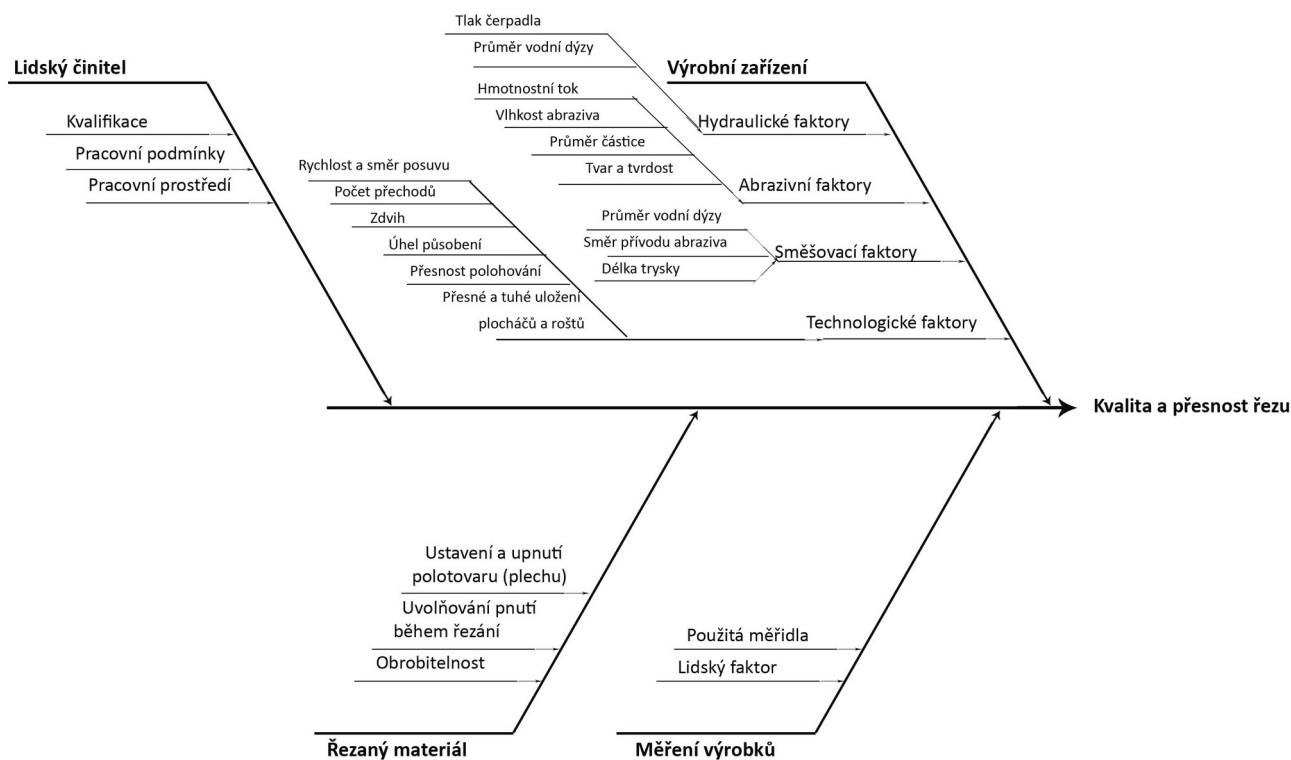


Legenda k obrázku 1.1:

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| 1. zásobník abraziva | 8. vodní trysky |
| 2. voda | 9. řezná hlava |
| 3. olej | 10. míchací komora |
| 4. vysokotlaké čerpadlo | 11. výstupní tryska |
| 5. vysokotlaké potrubí | 12. příčník |
| 6. spirálový kompenzátor | 13. obrobek |
| 7. vysokotlaký ventil | 14. opěrný rošt |

Řezné parametry vycházejí z požadované kvality výrobku, materiálu výrobku a technických možností daného stroje. Na proces řezání a jeho výslednou kvalitu má vliv řada faktorů, což dokládá diagram příčin a následků na obrázku 1.2.

Obrázek 1.2 – Ishikawův diagram



1.3. Hlavní parametry

Mezi hlavní parametry ovlivňující kvalitu řezu a produktivitu řezání vodním paprskem se řadí:

1. Hydraulické faktory
2. Technologické faktory
3. Abrazivní faktory

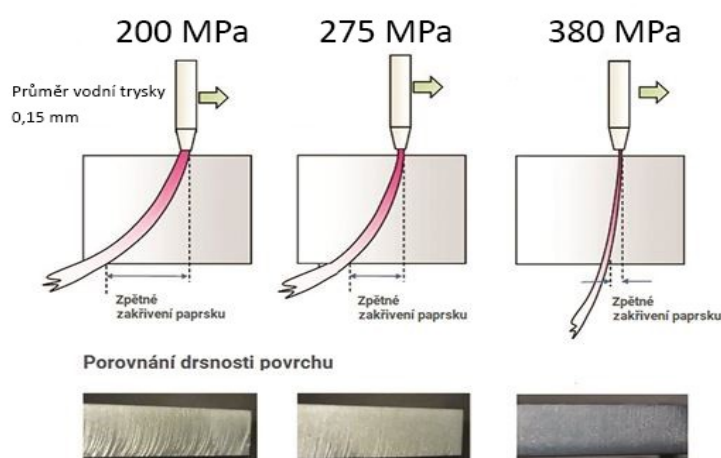
1.3.1 Hydraulické faktory

Se zvyšujícím se tlakem vody se při řezání zvyšuje kvalita řezných hran, rychlosti proudění a tedy celkové energie v dýze. Díky tomu lze řezat materiály o větší tloušťce. [4]

Tab. 1.1 – Rychlostní proudění v závislosti na tlaku a průměru vodní trysky [3]

Tlak vody [MPa]	Průměr vodní trysky [mm]	Rychlost proudění [l.min ⁻¹]
380	0,15	0,64
	0,30	2,60
275	0,15	0,17
	0,30	2,20
200	0,15	0,49
	0,30	2,00

Obrázek 1.3 - Závislost produktivity na tlaku. Vyšší tlak zvyšuje kinetickou energii abrazivních částic obsažených v paprsku. [6]



1.3.1.1 Vysokotlaká čerpadla

Toto zařízení je zdrojem vysokého tlaku kapaliny. V praxi se používají dva druhy zařízení generující vysokotlaký vodní paprsek, a to zařízení s multiplikátorem a zařízení s triplexovým plunžrem.

Multiplikační čerpadlo

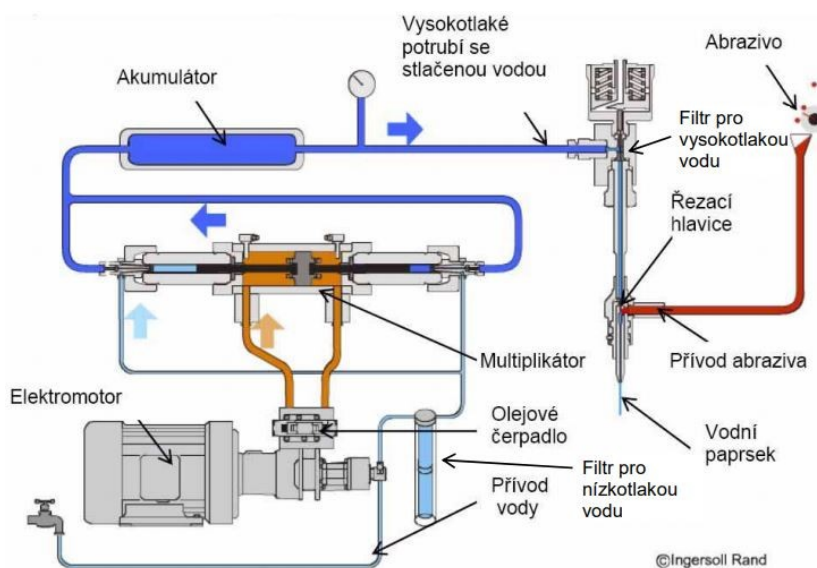
Vysokotlaká vodní čerpadla jsou dodávána na základě požadavků zákazníka s ohledem na množství spotřeby vody a na maximální dodávaný tlak. Spotřeba vody a maximální dodávaný tlak jsou hlavními faktory hodnocení vhodnosti pro použití pro hydroabrazivní vodní paprsek a využití dvou či více řezacích hlav, pracujících současně na jednom stroji. Průtok vody se pohybuje v rozmezí 0,16 l/min – 12,7 l/min a tlak až do výše 700 MPa při výkonu v rozmezí 19 kW – 150 kW. Součástí vysokotlakého vodního čerpadla

jsou elektromotor, který pohání olejové čerpadlo, a akumulátor, který je zařazený za multiplikátorem a plní funkci tlumiče pulzů. [2, 7]

Zařízení se skládá z nízkotlakého (primárního) okruhu a vysokotlakého (sekundárního) okruhu. Sekundární okruh je řízený primárním okruhem za pomoci tlaku řídicí kapaliny, který je vytvářen hydraulickou jednotkou. [2, 7]

Nejrozšířenějším čerpadlem je zařízení s jedním dvojčinným multiplikátorem. Olej z hydraulického čerpadla prochází rozvaděčem do nízkotlakého válce multiplikátoru a vyvolává přímočarý pohyb pístů, které jsou mezi sebou pevně spojeny. Z 21 MPa tlaku oleje se ve dvoustranně působícím multiplikátoru vytvoří až 700 MPa tlaku vody. Tím ovlivněná pracovní kapalina, která se nachází v jednom z válců vysokého tlaku, postupuje zpětným ventilem, tlumičem pulzů a vysokotlakým filtrem do řezací hlavy. Zároveň kapalina proudí do druhého válce vysokého tlaku z hydraulického čerpadla přes filtr a zpětný ventil a zaplňuje dutinu multiplikátoru. Posuv pístů doprava i doleva je omezen dorazy s mikrospínači, které dávají řídicí signál rozvaděči. [2, 7]

Obrázek 1.4 – Schéma vysokotlakého multiplikačního čerpadla [22]



Tlak kapaliny ovlivňuje činnost vodního paprsku i v dalších aspektech:

1. Hydraulická účinnost

Hydroabrazivní paprsek je tvořen vysokotlakou vodní tryskou a abrazivními částicemi ve směšovací dýze. Tlak vodního paprsku má vliv na celkový výkon řezného systému hydroabrazivního paprsku

prostřednictvím provozních a fenomenologických faktorů. Vyšší tlak má za následek nižší hydraulickou účinnost, častější údržbu, vysoké míry opotřebení směšovacích dýz a fragmentaci částic před výstupem z dýzy. Díky vysokému tlaku lze dosáhnout hlubšího řezu a použít vyšší rychlost posuvu. [26]

2. Rozšiřování paprsku

Vodní paprsek se skládá ze zóny jádra pevného paprsku, která se postupně rozpadá na kapky. Oblast rozstříku obklopuje paprsek a obsahuje velmi malé kapičky při nízkých úrovních energie, které za běžných okolností nepoškozují materiál obrobku. Délka pevného jádra závisí hlavně na vnitřní turbulenci paprsku. V důsledku toho je nejvýznamnějším faktorem, který je třeba během formování paprsku řídit, obsah turbulence v toku tekutiny. Rozpad způsobený turbulencí toku se nazývá primární rozpad. Při větších odstupových vzdálenostech se paprsek dále rozpadá kvůli aerodynamickým účinkům; tomuto jevu se říká sekundární dezintegrace. [22]

3. Opotřebení abrazivní směšovací dýzy

Vodní dýza je základní a nejdůležitější část řezací hlavy, neboť vytváří a tvaruje vodní paprsek. Pro volbu materiálu, ze kterého je tryska vyrobena, je nejdůležitějším faktorem pracovní tlak, kterým bude zatěžována. Pro trysky zatížené tlakem vody do 150 MPa se volí nerezavějící ocel, při tlaku do 250 MPa se využívá keramika či tvrdokovy. Pro pracovní tlaky vyšší než 250 MPa se používají trysky vyráběné z rubínu, safíru či umělého diamantu. Průměry trysek jsou v rozsahu 0,075 mm – 1,5 mm. Diamantové trysky mají v porovnání s ostatními materiály nejdelší životnost, která dosahuje v extrémních případech při velmi vysoké kvalitě vody až 1 000 pracovních hodin; to je zhruba 5 krát více než u trysek vyrobených ze safíru. Vzhledem k univerzálnosti technologie hydroabrazivního paprsku existuje mnoho tvarů vodních trysek v závislosti na pracovních tlacích a kapalinách. [2, 4]

Abrazivní směšovací dýza, která je součástí řezací hlavy, může ovlivnit výstupní abrazivní vodní paprsek, a to svou délkou a průměrem. Pro běžné dělení se používá průměr v rozmezí 0,8 mm – 1,2 mm při délce 75 mm – 125 mm. Kvůli zachování kvality a provozuschopnosti je u zaostřovací trubice důležitá otěruvzdornost. Proto jsou materiály pro výrobu zaostřovací trubice extrémně tvrdé. Neustále proudící pracovní kapalina zintenzivněná abrazivem však trubicí postupně opotřebovává. Ústí trubice se zvětší zhruba o 0,002 mm za jednu hodinu provozu. Toto opotřebení má vliv na výsledný rozměr výrobku a tak se při delších programech u výrobků, kde se dbá na maximální přesnost musí kalibrovat průměr paprsku, popřípadě se musí vyměnit dýza za novou. [2,4]

1.3.2 Abrazivní faktory

Při vstupu abraziva do směšovací komory sehraává podstatnou roli voda, která díky Venturiho efektu přisává abrazivo. Poté odvádí použité abrazivo a mikročástice obrobku. [15]

Hloubku řezu ovlivňuje druh abraziva, jeho tvar, zrnitost a tvrdost.

Se zvyšováním hmotnostního toku abraziva do vodního paprsku se zvyšuje dosahovaná hloubka řezu. Toto však platí do určitého kritického hmotnostního toku, při jehož překročení hloubka řezu už nenarůstá, ale začíná klesat. Stane se tak proto, že se část energie spotřebovává při vzájemných nárazech abrazivních částic. [4, 9, 15]

Vodní paprsek ovlivňuje i směšování abraziva. Především tvar a rozměr směšovací komory a abrazivní dýzy. Rozměry komory a tlak kapaliny udávají maximální hmotnostní tok abraziva. V komoře se mění charakter proudění vrstev kapaliny z laminárního na turbulentní, vzniklý podtlak umožní nasávání abraziva ze zásobníku. Čím vyšší podtlak, tím větší maximální hmotnostní tok. V komoře probíhá prvotní promíslení abraziva s proudem kapaliny. [4, 9, 15]

Abrazivo je podstatnou součástí technologie vodního paprsku; přidáním abraziva se několikanásobně zvýší řezná účinnost paprsku a je tak možné řezat i velmi tvrdé materiály. Řezání vodním paprskem bez přidání abraziva se užívá jen v případě velmi měkkých materiálů (např. papír, polystyren, atd.). S přihlédnutím k vzhledu abraziva lze zjednodušeně konstatovat, že se jedná o velmi jemný sypký prášek, který je složen z různých chemických prvků a jeho zrna mají různou velikost, tvrdost a ostrost. [10]

Nejdůležitějším faktorem abraziva je zrnitost, která se udává v jednotkách MESH (tj. počet ok síta na čtverečný palec). S přihlédnutím k druhu a vlastnostem řezaného materiálu se volí zrnitost abraziva. Hloubka řezu závisí na velikosti zrn. [7, 11]

Obvykle se používají uměle vyrobená abraziva, u kterých je možné snadněji kontrolovat chemické složení, krystalickou strukturu, tvrdost, řezné vlastnosti a velikost. Jediným přírodním abrazivem je granát. [7]

Vývoj nových abraziv jde stále kupředu, např. vývoj abraziv rozpustná ve vodě. [7]

Používaná abraziva :

1. Granát – Je abrazivem použitým při řešeném experimentu a proto je obšírněji popsán v kapitole Návrh experimentální činnosti.
2. Olivín – Jedná se o levnější a měkkší abrazivo a tím je podmíněn i jeho nízký řezný výkon. Využívá se v provozech, kde je upřednostněna ziskovost před výkonností. [7]

3. Křemičitý písek – Poměrně levné abrazivum s podstatně nižším řezacím účinkem a opotřebením trysky. Jeho využití je dnes výrazně menší, neboť jeho zrna mají malý počet řezných hran a dochází tak k rychlému otupení. Další nevýhody spočívají v uvolňování křemičitého prachu, který je karcinogenní a nebezpečný pro životní prostředí. Mimoto je křemičitý písek nevhodný k recyklaci. [7]
4. Oxid hlinitý – Pro toto abrazivum jsou charakteristické poměrně tvrdé, ostré a stabilní zrna s vysokou řezací schopností. Je dobře recyklovatelné a jeho pořizovací cena je vyšší. [7]
5. Ocelová drť a broky – Proces výroby drti spočívá v ohřátí oceli, která je následně zkalena ve vodě a poté je rozdrčena do jemného prášku. [7]

1.3.3 Technologické faktory

Aby bylo dosaženo co nejvyšší kvality řezu, měly by být zachována vzdálenost mezi tryskou a obrobkem. Optimální vzdálenost při řezání je 1,5 – 3 mm. Při vyšší vzdálenosti dochází k zaoblení horní hrany řezu. Příčinou je buď ztráta soudržnosti vodního paprsku při průchodu vzduchem, tedy jeho rozšiřování a následné snížení tlaku a rychlosti kapaliny, nebo zvýšený úhel řezu. Přílišná vzdálenost způsobí, že paprsek postrádá dostatek energie k tomu, aby zcela pronikl materiálem, a bude ho tak jen plasticky deformovat. [18]

Změna geometrie řezu je zapříčiněna těmito faktory:

1. Malá vzdálenost dýzy od materiálu, kdy vodní paprsek o vysoké kinetické energii rozrušuje materiál ve svislém a radiálním směru.
2. Optimální vzdálenost dýzy od materiálu stabilizuje paprsek.
3. Velká vzdálenost vodního paprsku od materiálu způsobuje rozpadávání vodního paprsku a k rozrušování materiálu dochází nejen kvůli kompaktnímu jádru, ale i působením vodní mlhy. [4]

Nejspolehlivější dodržení vzdálenosti je automatické řízení výšky. [18]

Obrázek 1.5 – Závislost kvality řezu na vzdálenosti trysky od obráběného materiálu [18]



Zvýšením počtu přechodů vodního paprsku po stejné řezné dráze při nezměněných technologických parametrech lze dosáhnout větší hloubky řezu. S každým dalším přechodem je přírůstek hloubky řezu nižší, což je způsobeno odporem stěny drážky. Zhoršuje se odchod použité kapaliny, abraziva a rozrušeného materiálu z řezu v dané hloubce. Tyto faktory společně vytvoří vodní bariéru pro následující vodní paprsek. [4]

Nejefektivnější úhel řezání je tehdy, kdy je vodní paprsek kolmý na řezaný materiál. Se změnou úhlu se mění hloubka a kvalita řezu, a to protože se pozměnil mechanismus rozrušování.

Z dosud provedených experimentů zkoumajících hloubku řezu a kvalitu řezu u různých materiálů vyplývá, že jednoznačné zvětšení rychlosti posuvu snižuje hloubku řezu. Zvýšení rychlosti posuvu snižuje dobu obrábění, což zefektivňuje ekonomické náklady. Zvyšování tlaku a abrazivního průtoku zvyšuje hloubku řezu, z hlediska účinnosti by však měl být tlak a abrazivní průtok tak velký, jak dovolují různá omezení. [27]

1.3.3.1 Přesnost polohování

Konstrukce CNC řezacího stolu

Pro konstrukci stolu je důležitá vhodná konstrukce s maximální tuhostí a zároveň vhodně zvolený materiál pro nosník portálu a jeho profil aby při přejezdech nebo při obrácení směru pohybu portálu nedocházelo k jeho pružnému prohnutí vlivem hmotnosti řezací hlavy.

Pohon posuvů

Pro přenos otáček ze servopohonu na pohyb dané části mechanismu se nejčastěji používají ozubené hřebeny, které jsou spolehlivé a mají dlouhou životnost, jejich nevýhoda je však v tom, že při jejich provozu dochází k jejich opotřebení a zároveň také k opotřebení ozubených kol umístěných na servopohonech. Tímto opotřebením vznikají vůle, které nejsou nijak vymezovány a tak dochází k snižování přesnosti polohování stroje a plynulosti pohybu. [4, 25]

Pro menší stoly se pro přenos otáček používají kuličkové šrouby, které mají oproti ozubeným hřebenům dokonalou plynulost pohybu a vyšší přesnost polohování. Jejich hlavní výhodou je, že při jejich provozu se vůle vzniklé opotřebením samy vymezují a tak je zajištěna stálá přesnost stroje. [4, 25]

1.3.3.2 Vliv řezné rychlosti na kvalitu řezu

Řezná rychlost má největší vliv na chybu úhlu řezu, což je obvyklá vada materiálu obráběného vodním paprskem definována jako odchylka od pravého úhlu na řezané hraně. [8]

Dalším faktorem, na který má řezná rychlost vliv, jsou rýhy ve spodní části řezu, které způsobuje tzv. skluz paprsku. Při větších dělicích rychlostech až dvě třetiny z tloušťky řezu je řezáno tzv. deformační zónou paprsku. [8,9]

1.4. Výsledná kvalita řezu

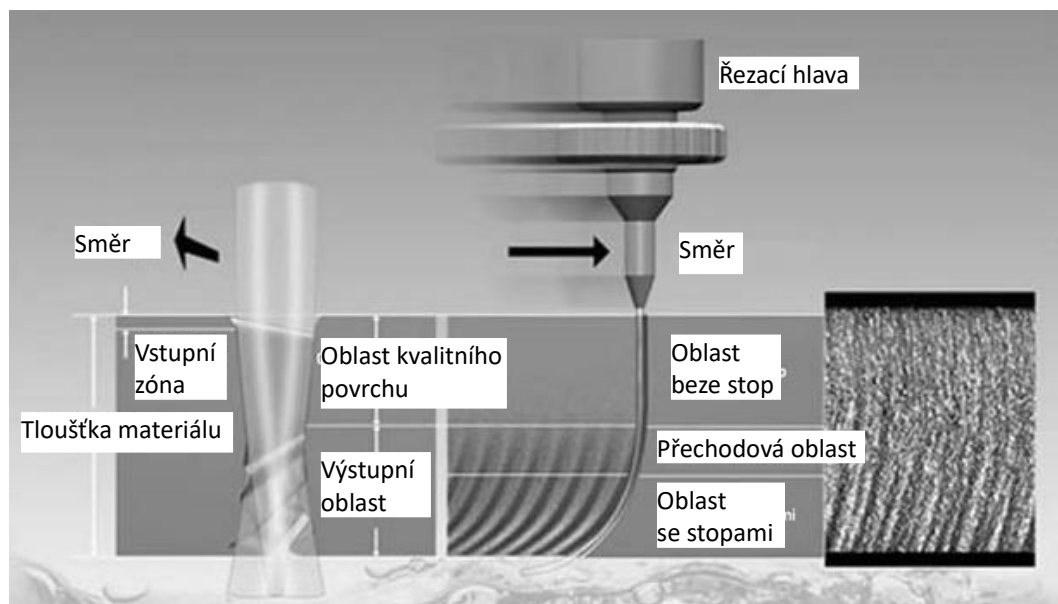
Kvalita spodní části řezu se zhoršuje se zvyšujícím se posuvem. Moderní regulátory proto umožňují nastavení kvality řezu s ohledem na požadavky. Otvory o vysoké přesnosti se řezou menší rychlostí pro vytvoření hladších a rovnějších řezných ploch. Vyšší řezné rychlosti, které mají za následek drsnější okraje, se používají při řezu méně významných ploch. [18]

Vodní paprsek při řezu zanechává stopu, která se dělí na tři oblasti:

1. Oblast kvalitního povrchu
2. Přejížděvací oblast
3. Oblast se stopami po řezání vodním paprskem [5]

Skladba je obdobná u všech tímto způsobem řezaných materiálů. Oblast kvalitního povrchu je úměrná rychlosti posuvu řezací hlavy vůči řezanému materiálu. [5]

Obrázek 1.6 – Kvalita povrchu řezu v závislosti na rychlosti řezání [5]



Na řezané ploše vzniká rýhování z vnitřních i vnějších příčin:

1. Proměnlivost procesních faktorů: rychlost posuvu, tlak, hmotnostní tok abraziva.
2. Vibrace obráběného materiálu a hlavice v průběhu dělení.
3. Vibrace způsobené nosičem abrazivní hlavice. [9]

V horní části řezu má většina částic vyšší energii, než je zapotřebí k destrukci, proto se může celá obrobená plocha přerazit a dosáhne se tak hladkého povrchu. S větší hloubkou přímo úměrně klesá energie, síla proudu se proto snižuje a rozšiřuje se vlnitý profil. Poté zůstávají ostré výběžky a žlábký na řezané ploše. [9]

Hydroabrazivní proud se od určité délky zakřivuje a toto zakřivení je v opačném směru, než je směr dělení materiálu. Důsledkem odklonění proudu o určitý úhel je zhoršování drsnosti a odchylka kolmosti řezné hrany ve směru kolmém na směr dělení. [9]

Poloha vstupu vodního paprsku do materiálu není totožná s polohou vystupujícího paprsku. Zaostávání vystupujícího paprsku se pohybuje v rozmezí od desetin milimetru až po několik desítek milimetrů. [9]

Nepravidelná hloubka stopy řezu vzniká kombinací dvou odchylek, a to stopou řezu a nepravidelnou hloubkou. Je těžké posoudit, která odchylka se projevuje více. [9]

Rozptýlenými částicemi kapaliny a abraziva s dostatečnou energií může dojít k porušení povrchové vrstvy řezaného materiálu. Výskyt kazu je ovlivněn primárně vzdáleností abrazivní dýzy od materiálu. Hraniční vzdálenost je 10 mm, při vyšší vzdálenosti je výskyt povrchových kazů výrazný. Směs vody a abraziva ovlivňuje řezaný materiál, výrazným způsobem především v blízkosti řezné hrany. Při řezání materiálů se zvláštní úpravou dochází k poškození povrchové vrstvy v blízkosti vodního paprsku, ke zdrsnění, ztrátě lesku a k otryskání povrchu, což ovlivňuje nejen vzhled, ale i funkčnost řezaného obrobku. K obzvlášť závažnému narušení funkčnosti však nedochází. [9]

Hydroabrazivní paprsek může zapříčinit vznik koroze na obráběném materiálu. Jedná se o problém vyskytující se u dělení konstrukčních uhlíkových ocelí. [9]

1.4.1 Terminologie vad při řezání

Názvosloví terminologie vad je ustáleno v ČSN EN ISO 17658. Tato mezinárodní standardizovaná norma definuje termíny možných vad při řezání kyslíkem, laserem a plasmou vyskytujících se u kovových materiálů, které jsou zde shromážděny a seskupeny. Nedostatky jsou nesouměrnosti nebo odchylky stanoveného tvaru a polohy řezu. Tato norma zahrnuje pouze nedostatky vznikající přímo při řezání kyslíkem, laserem a plasmou; jakékoliv nepříznivé (pasivní) účinky plynoucí z dodatečných vnějších napětí nebo zatížení nejsou uvažovány. Typy, tvary a místa těchto nedostatků jsou seskupeny dohromady, ale podmínky a příčiny vzniku nejsou stanoveny. [13]

Informace týkající se ohodnocení a výsledků výše zmíněných nedostatků nejsou stanoveny, protože se odvíjí od specifik pracovních požadavků. Výrazy byly zvoleny tak, aby charakterizovaly zmíněné hlavní nedostatky, avšak dva a více výrazů mohou vyhovovat zároveň. Použitý systém uskupení nelze považovat za zhodnocení kvality. [13]

1.4.1.1 Popis vybraných nedostatků kvality řezu podle normy

- 1) Nedostatky na řezných hranách
- 2) Nedostatky na řezných plochách
- 3) Struska
- 4) Praskliny
- 5) Ostatní nedostatky [13]

Nedostatky na řezných plochách

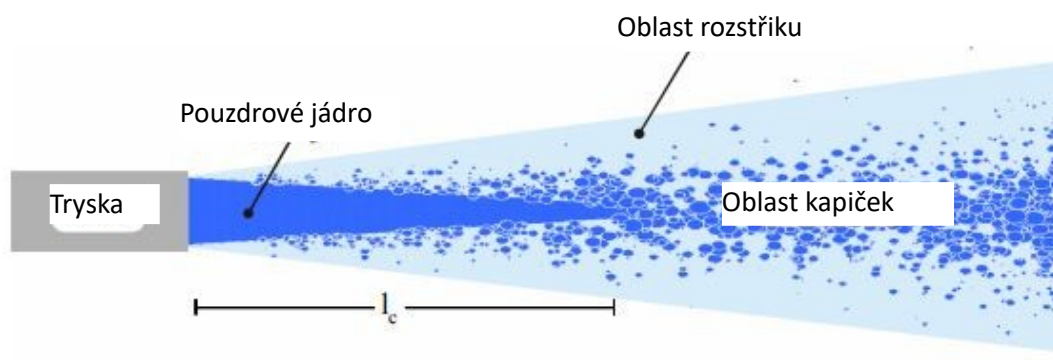
Jedná se o odchylky z požadovaného profilu.

1. Geometrické odchylky

Geometrie řezání je ovlivněna především odchýlením vodního proudu od kolmé směru. Usměrněný vodní paprsek se rozpadá se zvětšující se vzdáleností od ústí dýzy. Úbytek soudržnosti proudu zapříčiňuje nárůst šířky proudu, pokles erozních (rozmělnovacích) a výkonnostních vlastností. Zhoršení soudržnosti paprsku je způsobeno ztrátou kinetické energie v důsledku odporu řezaného materiálu. Dalším faktorem, který má vliv na soudržnost paprsku, je také tvar proudového jádra (Obrázek 1. 6). [9]

Výsledný tvar řezané hrany je tvořen působením pružného proudu a částečně rozptýleného proudu s proměnlivou velikostí. Dle charakteru řezné mezery se určuje dosažená kvalita řezné plochy. [9]

Obrázek 1.7 Rozpad vodního paprsku [22]



2. Rozšiřování řezu

Rozšiřování do zvonu/rozšiřování zářezu na jedné nebo obou stranách zkosení řezu na jedné nebo na obou stranách [13]

Delším působením proudu je horní část materiálu vystavena erozním účinkům více než spodní část a výsledný řez je v horní části širší než v dolní. Další příčinou vzniku této odchylky může být odraz paprsku od materiálu, což má za následek erozi boků vodní štěrbin. Jde o nejčastější typ odchylky. [9]

Obrázek 1.8 - Zkosení řezu na jedné straně a na obou stranách [13]



3. Odchylka úhlu řezu

Tedy, když úhel zkosení (úkosu) alfa není tak, jak bylo specifikováno, ačkoliv byla zachována šířka zářezu. [13]

Obrázek 1.9 - Odchylka úhlu zkosení na obou řezných plochách a na jedné řezné ploše [13]



4. Odchylka rýh

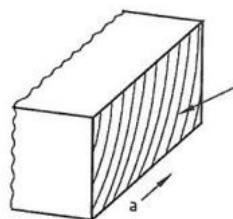
Rýhy se různí od standardního sklonu.

5. Nadměrné obrácení toku rýh

Nadměrné zpětné vychýlení rýh proti směru řezu. [13]

Obrázek 1.10 - Nadměrné zpětné vychýlení rýh

a – směr řezání [13]

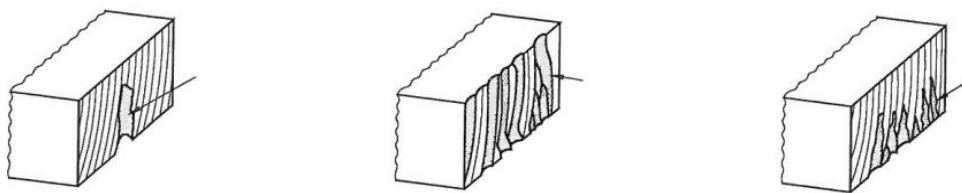


6. Žlabkování

Sejmutí materiálu z řezné plochy, v omezené hloubce, obecně v směru řezu. Šířka a hloubka žlabků přesahuje šířku a hloubku rýh. Žlábků mohou být buď osamocené nebo seskupené. [13]

Na řezaném povrchu je pro striaci charakteristická obdobná struktura. Tvar, velikost a hloubka striací se odvíjí od řezaného materiálu, jeho tloušťky, řezné rychlosti a dalších faktorů. Striace mohou být zakřivené a ovlivnit tak drsnost povrchu či zapříčinit zvlnění řezné plochy a změnu řezné hrany během řezání. [20]

Obrázek 1.11 - Izolované žlábků - Seskupené žlábků - Seskupené žlábků dolní části řezné plochy [13]



Obrázek 1.12 - Ukázka seskupených žlabků na řezaném vzorku z materiálu HARDOX 500, tl. 35 mm

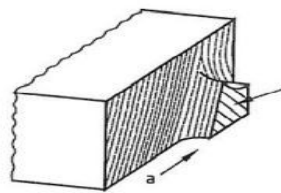


7. Neúplné zakončení řezu

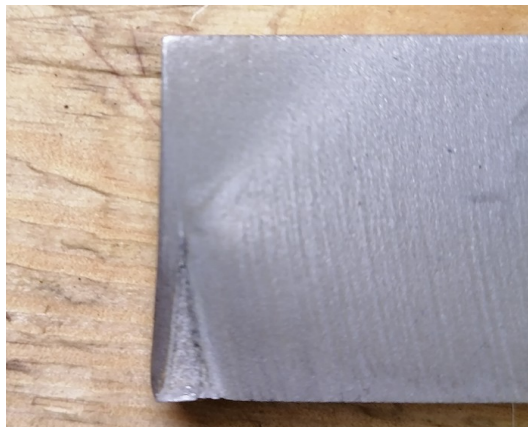
K tomuto jevu dochází tehdy, kdy nedojde k přeřezání materiálu po celé jeho tloušťce. Příčinou bývá tzv. přeskočení proudu. Proud dosáhne v horní části bodu A a v dolní části je spodek materiálu vzdálen o délku L před bodem A. Navzdory zastavení nebo výraznému zpomalení posuvu se hydroabrazivní proud stále pohybuje. Horní poloha je neměnná a zaostávající část proudu ve spodní části přeskočí materiál, který tak není přeřezán. [9]

Obrázek 1.13 - Neúplné zakončení řezu

a - směr řezání [13]



Obrázek 1.14 - Ukázka neúplného zakončení řezu na řezaném vzorku z materiálu HARDOX 500, tl. 35 mm



8. Prasklina

Diskontinuita způsobená místní rupturou, která může vzniknout vlivem ochlazování nebo namáhání. [13]

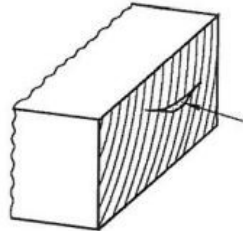
9. Mikrotrhliny

Trhliny/praskliny obvykle viditelné pouze mikroskopem. [13]

10. Makrotrhliny

Trhlina viditelná pouhým okem. [13]

Obrázek 1.15 - Makrotrhlina na řezné ploše [13]



Ostatní nedostatky

Odchylky na začátku řezu – Nedostatky na počáteční hraně.

Nedostatky propichování (prorážení, probodnutí) – nedostatky propíchnutých děr hrany. [13]

Ztracený (neúplný) řez – řez v pevném materiálu, ve směru hloubky řezu nebo ve směru řezání, který nebyl zcela dokončen. [13]

Obrázek 1.16 - Ztracený řez ve směru hloubky řezu a ztracený řez ve směru řezání [13]



Rozměrová odchylka – odchylka od nominálních (jmenovitých) rozměrů [13]

2. Návrh experimentální činnosti

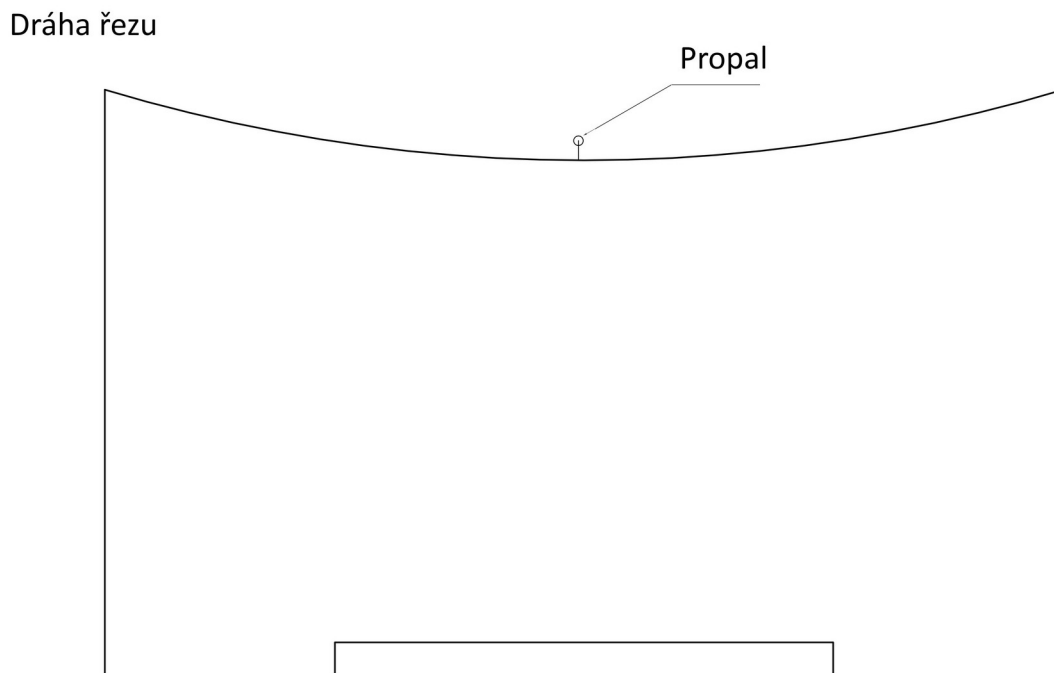
Pro experimentální řezání vzorku a následné měření parametrů drsnosti povrchu na plochách řezu byl vybrán materiál Hardox 500 o tloušťce 8mm. Na výukové hale Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie Fakulty strojní VŠB-TUO je k dispozici stroj firmy PTV řady Cobra, na kterém řezání probíhalo. Cílem návrhu experimentální činnosti je stanovit optimální řezné parametry z hlediska požadované kvality povrchu a popsat úkony potřebné pro provedení experimentálního řezání.

2.1. Náskres řezu – strategie

Před řezáním jakéhokoliv profilu je nutné v materiálu vyhloubit otvor, aby mohl vodní parsek procházet skrz materiál a provádět tak účinné řezání. Toto hloubení se odborně nazývá propal. Za propalem obvykle následuje nájezd, což je krátký úsek řezu, kterým se vodní paprsek přemístí na samotný obrys řezaného výrobku. V tomto místě na povrchu řezané hrany výrobku vždy vznikne malý žlábek po dořezání již zmiňovaného profilu, jeho uvolněním, anebo zde zůstane nepatrný objem materiálu vzniklý přeskočením paprsku při dořezávání výrobku. Z těchto důvodů je nutné propal s nájezdem umísťovat na část profilu, která nebude mít zásadní vliv na funkci součásti, anebo bude po této operaci dále opracovávána (např: frézováním, úkosováním) a její kvalita a celistvost tak nemá větší význam.

Z náskresu strategie řezu je patrné umístění propalu. Propal byl na tuto část profilu, která má tvar rádius R173,1, umístěn proto, že podle technologického postupu bylo v plánu tuto stranu po vyřezání dílu ještě dokončit frézováním, a tak nebylo nutné zachovat celistvost řezaného profilu v tomto místě.

Obrázek 2.1 Strategie řezu



2.2. Experimentální materiál – Hardox 500

Hardox je označení otěruvzdorné oceli, která splňuje náročné požadavky na vysokou odolnost proti otěru a abrazivnímu opotřebení. Pro plechy je charakteristická vysoká tvrdost, pevnost, výborná houževnatost a svařitelnost, což umožňuje široké spektrum užití tohoto materiálu. [16, 17]

Plech Hardox 500 jsou zakalené v celém průřezu a popouštěné, minimální tvrdost ve středu tloušťky je 90 % ze zaručené minimální tvrdosti povrchu. [16, 17]

Výborná svařitelnost a přijatelná obrobiteľnosť usnadňuje zpracování plechů Hardox navzdory skutečnosti, že je tento materiál třikrát až čtyřikrát tvrdší než běžné ocelové plechy. Doba životnosti závisí jak na materiálu, tak na typu opotřebení, kterému je plech vystaven. [16, 17]

Pro svou pevnost má Hardox vyšší tvarovou stabilitu a může odolat většímu množství trvalé deformace. Díky vysoké houževnatosti odolává tato ocel rázům i při velmi nízkých teplotách. Odolnost rázovému namáhání je výsledkem precizního chemického složení oceli a optimálního výrobního procesu. [17]

Skupina ocelových slitin Hardox může být zpracována nejen tradičními mechanickými řezacími procesy, jako je frézování nebo vrtání, ale také méně tradičními procesy, jako je termální řezání nebo řezání hydroabrazivním paprskem. Jednou z výhod řezání vodním paprskem je absence modifikace vlastností materiálu během výrobního procesu. Ve všech ostatních případech řezání existuje tzv. HAZ, nebo-li zóna

ovlivněná teplem, což pro ocel Hardox znamená snížení její počáteční tvrdosti. Proto má při dělení vodním paprskem dělená hrana stejnou tvrdost jako ostatní materiál. [17, 24]

2.2.1 Mechanické vlastnosti a chemické složení

Hardox 500 je spolu s Hardox 450 nejvíce komerčně používanou třídou uvedeného materiálu. Tvrdost oceli Hardox 500 je v rozmezí 470 – 540 HBW, jeho jmenovitá tvrdost pak 500 HBW. Prokalitelnost oceli zaručuje, že minimální tvrdost jádra odpovídá 90 % tvrdosti povrchu. Mez kluzu se pohybuje okolo 1300 MPa, mez pevnosti okolo 1550 MPa, hodnota tažnosti je 8 %. Rázová houževnatost při teplotě – 40 °C je 30 J. Standardní tloušťka plechů je v rozmezí 4 – 103 mm. Ohybatelnost plechů je ve třídě F. [16, 17, 24]

Ve srovnání se svou tvrdostí a houževnatostí má Hardox 500 nízké hodnoty uhlíkového ekvivalentu. Důsledkem je dobrá svařitelnost. Stejnorodá kvalita, výborná rovinnost a kvalita povrchu jsou dalšími charakteristickými znaky tohoto plechu. Ocel může být otryskaná a natřená protikorozním nátěrem. [17]

Tabulka 2.1 – Chemické složení materiálu Hardox 500 [16]

Chemické složení

Jakost	C (max. %)	Si (max. %)	Mn (max. %)	P (max. %)	S (max. %)	Cr (max. %)	Ni (max. %)	Mo (max. %)	B (max. %)
Plech	0,30	0,70	1,60	0,020	0,010	1,50	1,50	0,60	0,005

Tabulka 2.2 – Uhlíkový ekvivalent CET (CEV) materiálu Hardox 500 [16]

Uhlíkový ekvivalent

Tloušťka (mm)	4,0 – 13,0 mm	13,1 – 19,9 mm	20,0 – 39,9 mm	40,0 – 103,0 mm
Max CET (CEV)	0,38 (0.53)	0,43 (0.64)	0,45 (0.66)	0,47 (0.75)
Typ CET (CEV)	0,37 (0.51)	0,41 (0.63)	0,41 (0.63)	0,43 (0.72)

2.3. Stroj

Řezání probíhalo na stroji firmy PTV, WJ4025 - 1Z - Cobra - PJ5AX – 60°. Mezi přednosti stroje náleží:

1. Nízké podélné osy pro lepší stabilitu stroje, přesnější řezání a snadný přístup k pracovní ploše podél stolu.
2. Modulární konstrukce stroje se 2 verzemi výšky portálu.
3. Délka podélných os 1 - 30 m.
4. Nová koncepce osy Z se zdvihem 500 mm pro řezání materiálu o síle až 320 mm (3D) / 500 mm (2D).
5. Nový design CNC stolu i ovládacího panelu s důrazem na ergonomii a použití vysoce odolných materiálů.
6. Extrémně robustní vysoká celooceľová konstrukce.
7. Přesná lineární vedení.
8. Kalené a broušené ozubené hřebeny a pastorky.
9. Mimořádně silné servopohony v kombinaci s velmi přesnými převodovkami.
10. Lineární odměřovací systém. [14]

Tabulka 2.3 – Technické parametry stroje WJ4025 - 1Z - Cobra - PJ5AX – 60° [14]

Maximální pracovní rychlost	20 000 mm/min
Poziční přesnost	+/- 0,04 mm / 300 mm
Opakovatelná přesnost	+/- 0,03 mm
Maximální přejezdová rychlost	30 000 mm/min
Zdvih osy Z	500 – 700 mm
Počet Z-supportů	1 - 2
Počet řezacích hlav	1 - 4
Max. šířka portálu	4 m
Max. délka lineárního vedení	až 30 000 mm

Obrázek 2.2 - WJ4025 – 1Z -Cobra – PJ5AX – 60° [23]



2.4. Použité abrazivo - granát, MESH 80

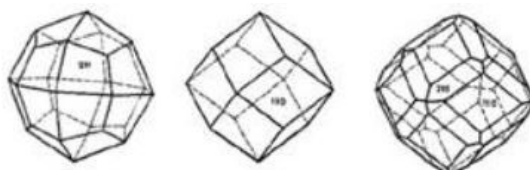
Granát je nejčastěji používaný druh abraziva díky své vysoké tvrdosti bez následků přílišného opotřebení nástroje a vyšší teplotní stabilitě. [15]

Almandin je železný hliníkový granát. Stejně jako jiné granáty, je tvořen zaoblenými krystaly s 12 kosočtverečnými nebo 24 lichoběžníkovými plochami nebo jejich kombinací s několika dalšími formami. Takovýto krystalický habitus je běžný pro granátové minerály. [15, 19]

Almandin je nejběžnější druhem granátu, ale zřídka se vyskytuje ve sbírkách drahých kamenů a není ani považován za vhodný pro výrobu drahokamů. Obvykle se vyskytuje buď jako minerál v magmatických a metamorfovaných kyselých horninách (jako jsou migmatity, granátovo-biotitické ruly, granulity, svory, pegmatity, diority atd.), nebo jako těžký minerální písek ze zvětralých tvrdých hornin, sekundárně koncentrovaný v již dříve existujících tocích a jiných náplavových ložiscích nebo na plážích a podél pobřeží. [15, 19]

Průmyslové brusivo vyrobené z granátu almandinu je převládající brusivo používané při řezání hydroabrazivním paprskem. Stupeň poškození velkých krystalů granátového almandinu (porfyroblastů) v horninách hraje důležitou roli při stanovení vhodnosti almandinu pro výrobu průmyslového brusného koncentráту pro řezání hydroabrazivním paprskem. [10, 15]

Obrázek 2.3 - Tvary krystalu granátu [19]



Tabulka 2.4 – Technické parametry granátu MESH 80 [21]

Tvrдост	7,0 – 7,5 Mohs
Vodivost	10,88 ms/m
Vlhkost	0,19 – 0,21 %
Sypká hmotnost	2,0 – 2,3 g/cm ³
Specifická hmotnost	3,9 – 4,0 g/cm ³
Tvar zrna	Hranatý až ostrohranný
Barva	Tmavě červená až tmavě hnědá

Obrázek 2.4 - Granát MESH 80 [21]



3. Provedení experimentální činnosti

Experimentální činnost spočívala ve vyřezání vzorku, který byl součástí větší zakázky pro Katedru obrábění a strojírenské metrologie VŠB-TUO, za pomoci hydroabrazivního paprsku. Zákazníkem požadovaný materiál pro výslednou součástku byl Hardox 500 pro svoji tvrdost a otěruvzdornost.

1. Programování

Samotnému experimentu řezání předcházelo vytvoření programu pro sadu dílů řezaných do daného polotovaru. Programování probíhalo v programu IGEMS. Program IGEMS umožňuje jak kreslení součástí, tak především pro složitější tvary nahrávání souborů ve formátu DXF, které jsou výstupy složitějších CAD systémů například AutoCADu.

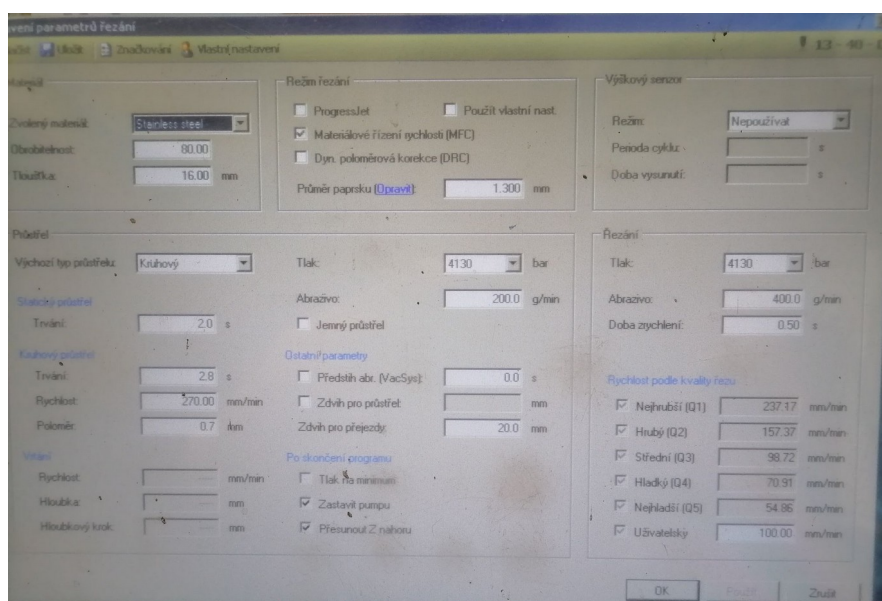
2. Nastavení programu na stroji

Po načtení programu na stroji jsme v menu (viz. Obrázek 3.1) nastavili dva základní parametry, a to řezaný materiál (v našem případě Hardox) a tloušťku polotovaru (8 mm). Z těchto údajů nám program vygeneroval řeznou rychlost $v_c = 108,5$ mm/min. Z předchozího řezání však už obsluha stroje věděla, že pro dosažení požadované kvality je potřeba tuto rychlost snížit. Řezání tak probíhalo na 85 % řezné rychlosti vygenerované programem. Pro maximální přesnost řezání bylo také nutné zkalibrovat průměr paprsku. To probíhalo tak, že jsme před spuštěním programu zařezali krátký řez do polotovaru rychlostí, která byla pro řezání vzorku vygenerována a následně jsme tento řez (řeznou spáru) změřili tzv. spárovými měrkami. Zjistili jsme, že šířka spáry byla 1,350 mm a tuto hodnotu jsme nastavili do programu. Řezalo se na maximální pracovní tlak 4 130 barů. Množství abraziva přiměšovaného do vodního paprsku jsme ponechali na 400 g/min pro řezy a 200 g/min pro průstřely; obě hodnoty byly vygenerované programem. Při průstřelech je dávka abraziva nižší z toho důvodu, že nedochází k dostatečnému vyplachování abraziva, které už splnilo svoji funkci, a tak by se v místě průstřelu hromadilo a prodloužilo by tak celkovou dobu průstřelu.

Tabulka 3.1 – Řezné parametry

Řezná rychlost	108,5 mm/min
Šířka spáry	1,350 mm
Dávkování abraziva pro řezy	400 g/min
Dávkování abraziva pro průstřely	200 g/min
Pracovní tlak	4 130 barů

Obrázek 3.1 - Nastavení programu



3. Ustavení polotovaru na řezacím stole

Nosná část řezacího stolu je konstruována tak, že na dně vany řezacího stolu jsou upevněny nosné plechy, navzájem od sebe vzdálené obvykle 80 - 100 cm. V této nosné konstrukci z plechů jsou pak zhotoveny drážky pro ploché tyče, které jsou v nich uloženy. Řezaný polotovar (plech) je buď uložen přímo na nich, anebo se využívá ještě tzv. poloroštů, které zamezí propadávání menších výrobků do řezací vany.

Při řezání vodním paprskem nevzniká nijak velká řezná síla, která by mohla s polotovarem (nejčastěji plechem) pohnout, a proto u větších a těžších polotovarů není většinou využíváno žádných upínek a řezaný materiál je upevněn ve své poloze pouze svou vlastní vahou. U lehčích a tenčích plechů však hrozí nadlehčení vířící vodou a k nežádoucímu posunutí řezaného materiálu na rostech. V takových případech jsou použity adekvátní upínky.

Pro řezání našeho vzorku a dalších dílů sady jsme nepoužili žádnou upínku ani jiné upnutí polotovaru, usoudili jsme totiž, že je příliš těžký na to, aby při řezání mohlo dojít k jeho nežádoucímu posunutí.

Obrázek 3.2 - Upínka



Obrázek 3.3 - Řezání vzorku



4. Hodnocení kvality řezu

Kvalita řezání je závislá na několika faktorech a pro získání co nejvyšší kvality je nutné podmínky dodržet.

Důležitým faktorem je udržování přibližně stejné vzdálenosti mezi tryskou a řezaným materiálem. Pokud je tryska příliš nízko, hrozí její uražení. A naopak, pokud je tryska příliš vysoko nad materiálem, hrozí otryskávání řezaného profilu. Parametry drsnosti a rozměrové přesnosti jsou závislé na vlastnostech a tloušťce řezaného materiálu, rychlosti posuvu, tlaku vody, průměru trysky, rychlosti proudění, druhu použitého abraziva a aditiv a na přesnosti polohování stroje.

Pracovní tlak je stanoven dle průměru vodní trysky. Při průniku do obrobku ztrácí paprsek vzájemným třením svou energii a vychyluje se z původního směru. Čím vyšší je rychlost posuvu, tím je vyšší drsnost povrchu. Nižší posuvovou rychlostí lze získat kvalitnější povrch.

Kvalitu povrchu lze hodnotit dle kvalitativních stupňů kvality řezu (viz. tabulka 4.1). Nežádoucím jevem při nižší drsnosti jsou vzrůstající výrobní náklady.

Drsnost povrchu

Vodní paprsek vytváří na řezaném povrchu reliéf. Ten se rozděluje na horní a dolní erozní zónu z hlediska kvality, která je posuzována dle průměrné aritmetické úchyly povrchu R_a ve svislém směru.

Horní erozní zóna má nižší průměrné hodnoty drsnosti povrchu R_a . Pro dolní erozní zónu jsou charakteristické vyšší průměrné hodnoty drsnosti povrchu R_a . [4, 9]

Oblast s nižší drsností povrchu se rozšiřuje při snižování rychlosti posuvu abrazivní hlavičky a prostupuje do větších hloubek řezaného materiálu. Se zvětšující se hloubkou řezu se zvyšuje průměrná hodnota drsnosti povrchu R_a . Kvalitnější povrch bývá tedy v horní části řezné plochy za použití nižšího tlaku hydroabrazivního paprsku, ale zároveň je kvalita řezu ovlivňována i určitou výstupní rychlostí abrazivních částic, jejich velikostí a počtem. Při vyšší tlaku dochází k rychlejší ztrátě kinetické energie částic, která je zapotřebí pro rozrušení materiálu. Proto lze dosáhnout jen v malých hloubkách vyšší kvality řezu. [4, 9]

Technologie, u kterých se využívá vysokotlakého vodního paprsku, obvykle pracují s přesností $\pm 0,1$ mm a opakovanou přesností $\pm 0,05$ mm. Výrobci CNC strojů využívajících technologii řezání vodním paprskem vynalezli inovační technologie, které pomáhají snížit výrobní náklady při dosahování požadované kvality a nabízí nové možnosti využití paprsku.

Firma FLOW nabízí technologii *DYNAMIC WATERJET* a firma PTV nabízí *ProgressJet*. Díky těmto technologiím lze dosáhnout tvarové přesnosti $\pm 0,4$ mm. Hodnoty dosahované průměrné hodnoty drsnosti povrchu se pohybují okolo $Ra\ 6,4\ \mu m$, obtížněji dosahované hodnoty jsou okolo $Ra\ 3,2\ \mu m$ a ve zvláštních případech i nižší drsnosti.

Tabulka 4.1 – Rychlostní proudění v závislosti na tlaku a průměru vodní trysky [12]

Stupeň kvality	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Charakteristika řezu	Separační řez	Hrubý řez	Čistý řez	Kvalitní řez	Excelentní řez
Drsnost Ra v horní části [μm]	4,0 - 6,3	Cca 4,0	Cca 4,0	Cca 3,2	Pod 3,2
Drsnost Ra v dolní části [μm]	Do 40	Do 25	Do 12,5	Cca 6,3	Cca 3,2
Tvarová přesnost v horní části [mm]	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,15$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
Tvarová přesnost v dolní části [mm]	Výrazné nepřesnosti	Dle typu a tloušťky materiálu	Dle typu a tloušťky materiálu	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$
Úkos	Výrazný kladný úkos	Dle typu a tloušťky materiálu	Dle typu a tloušťky materiálu	Většinou minimální	Většinou mírný podřez

Obrázek 4.1 – Závislost kvality řezu na rychlosti vodního paprsku

Q1 – separační řez, Q2 – hrubý řez, Q3 – čistý řez, Q4 – kvalitní řez, Q5 – excelentní řez [12]



4.1. Optický mikroskop

Hodnocení kvality řezu řezaného vzorku probíhalo na stroji Alicona Infinite Focus G5 s rotační upínací jednotkou z Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, VŠB-TUO Ostrava.

Tabulka 4.2 - Technické parametry [16]

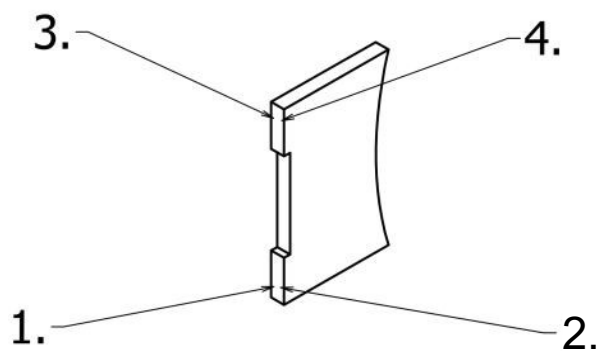
Velikost objektivu – zvětšení	5x, 10x, 20x, 50x, 100x
Pracovní rozsah	(100 x 100 x 100) mm
Maximální výška měřeného objektu	100 – 345 mm
Maximální hmotnost objektu	30 kg
Importované formáty	3D data (AL3D, STL, G3D, IGES, STEP)
Obrázkové formáty	(BMP, JPG, PNG, SolidWorks, CATIA)
Maximální velikost součásti pro rotační jednotku	45 mm

Obrázek 4.2 - Optický mikroskop [16]



4.2. Naměřené hodnoty na řezaném profilu

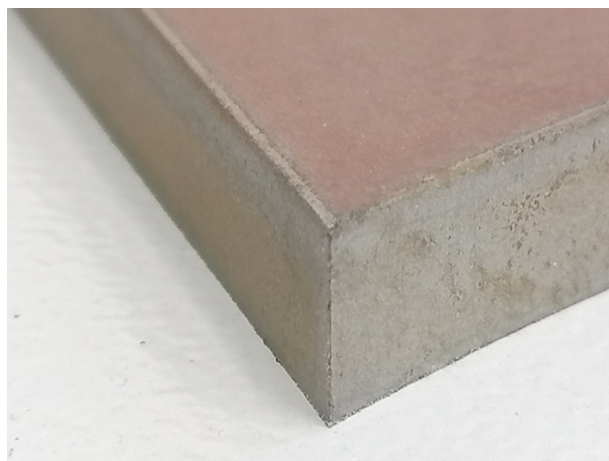
Obrázek 4.3 - Pozice bodů, ve kterých byla měřena drsnost řezaného vzorku



Obrázek 4.4 - - Řezaný vzorek



Obrázek 4.5 - Řezaný vzorek



Tabulka 4. 3 - Tabulka hodnot naměřených na vzorku v bodě č.1

Bod měření č.1	Měřený parametr drsnosti povrchu			
	Ra		Rz	
	Příčně	Podélně	Příčně	Podélně
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Měření č.1	2,23	1,919	7,91	5,993
Měření č.2	2,536	3,919	10,368	11,728
Měření č.3	2,959	2,13	11,733	6,754

Tabulka 4. 4 - Tabulka hodnot naměřených na vzorku v bodě č.2

Bod měření č.2	Měřený parametr drsnosti povrchu			
	Ra		Rz	
	Příčně	Podélně	Příčně	Podélně
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Měření č.1	2,45	1,826	6,947	6,621
Měření č.2	2,367	1,618	8,476	5,992
Měření č.3	2,296	1,463	9,658	4,387

Tabulka 4. 5 - Tabulka hodnot naměřených na vzorku v bodě č.3

Bod měření č.3	Měřený parametr drsnosti povrchu			
	Ra		Rz	
	Příčně	Podélně	Příčně	Podélně
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Měření č.1	3,258	2,681	11,889	10,069
Měření č.2	2,314	1,573	7,483	5,852
Měření č.3	2,956	2,001	9,335	6,246

Tabulka 4. 6 - Tabulka hodnot naměřených na vzorku v bodě č.4

Bod měření č.4	Měřený parametr drsnosti povrchu			
	Ra		Rz	
	Příčně	Podélně	Příčně	Podélně
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Měření č.1	2,233	1,872	8,262	5,41
Měření č.2	2,499	2,034	7,327	6,989
Měření č.3	3,311	2,989	9,565	7,133

4.2.1 Analýza dat naměřených hodnot

Aritmetický průměr [μm]

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(4.1)

Výběrová směrodatná odchylka [μm]

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

(4.2)

kde n je počet měření

x_i jsou naměřené hodnoty parametrů drsnosti. [28]

Tabulka 4.7 – Profilové parametry drsnosti povrchu

	Měřený parametr drsnosti povrchu			
	Ra		Rz	
	Aritmetický průměr příčného měření	Aritmetický průměr podélného měření	Aritmetický průměr příčného měření	Aritmetický průměr podélného měření
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Bod měření č. 1	2,575	2,656	10,003	8,158
Bod měření č. 2	2,371	1,635	8,360	5,666
Bod měření č. 3	2,842	2,085	9,569	7,389
Bod měření č. 4	2,681	2,298	8,384	6,51
max	3,311	3,919	11,889	11,728
min	2,23	1,463	6,947	4,387
S(x) pro bod měření č. 1	0,3661	1,099	1,937	3,115
S(x) pro bod měření č. 2	0,077	0,182	1,359	1,152
S(x) pro bod měření č. 3	0,482	0,559	2,212	2,329
S(x) pro bod měření č. 4	0,562	0,604	1,124	0,956

5. Zhodnocení výsledků naměřených dat

Pro vyhodnocení experimentu byl použit optický mikroskop Alicona Infinite Focus G5, kterým byly měřeny parametry drsnosti povrchu na čtyřech místech řezaného vzorku.

Každé místo bylo změřeno třikrát, a to ve směru působení vodního paprsku a proti směru působení vodního paprsku. Z těchto tří naměřených hodnot je vždy vypočítán průměr a směrodatná odchylka. Tyto hodnoty jsou zanesené v tabulce 4.7, a kromě nich jsou zde ještě uvedeny maximální a minimální hodnoty naměřené v daném bodě.

Poměrně velké rozdíly u některých hodnot naměřených parametrů drsnosti mohou být způsobeny například tím, že polotovár, do kterého se vzorek řezal, nebyl k řezacímu stolu nijak upnut a to mohlo způsobit vibrace, které negativně ovlivnily drsnost řezaného profilu.

Závěr

První část bakalářské práce byla zaměřena na vypracování řešerše s ohledem na principy metody obrábění vodním paprskem a byly v ní uvedeny parametry, které ovlivňují nejen kvalitu, ale i produktivitu výroby. Popisuje mechanismus úběru materiálu a charakter hydroabrazivního paprsku jako nástroje. Dále pak práce hlouběji rozvádí charakter této technologie a vady, které jsou pro ni typické podle normy ČSN EN ISO 17658.

V praktické části byl pro výrobu vzorku zvolen materiál Hardox HX 500 tloušťky 8mm. Pro řezání byl k dispozici stroj firmy PTV řady Cobra, jenž je v práci blíže specifikován. Jako abrazivo byl použit přírodní granát. Řezalo se na nejvyšší stupeň kvality Q5 z důvodu, že některé části řezaného profilu už po této operaci nebylo podle technologického postupu v plánu jinak opracovávat. Z téhož důvodu byl pro řezání zvolen režim ProgressJet, který eliminuje podkosení řezaného profilu.

Pro vyhodnocení experimentu byl použit optický mikroskop Alicona Infinite Focus G5, kterým byly měřeny parametry drsnosti povrchu na čtyřech místech řezaného vzorku. Poměrně velké rozdíly naměřeného parametru drsnosti R_a mohou být způsobeny lokální vlhkostí určitého množství abraziva, což se při řezání projeví tak, že vlhčí abrazivo klade větší odpor nasátí do směšovací komory, a tak dojde k zakolísání dávky abraziva. Tato, i když třeba nepatrná, odchylka v dávkování abraziva má za následek změnu charakteru vodního paprsku, což se zákonitě musí projevit na řezaném profilu a jeho drsnosti. Z toho vyplývá, že je velmi důležité udržovat abrazivo v suchu a nejlépe zamezit jeho styku se vzdušnou vlhkostí.

Výsledky jasně ukazují, že při měření příčně proti směru působení vodního paprsku vykazuje povrch řezané součásti větší drsnost než při měření podél směru působení vodního paprsku. Tento jev je způsoben dráhou, po které se pohybují částice abraziva unášené vodním paprskem. Ty totiž zanechávají rýhy na povrchu řezaného profilu, a i když se v tomto případě řezalo na maximální stupeň kvality řezu a tyto rýhy nejsou pouhým okem viditelné, z naměřených hodnot je patrné, že tento jev přetrvává.

6. Seznam použitých zdrojů

- [1] *O technologii řezání vodním paprskem* [online]. 2021 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.vodnipaprsek.com/o-vodnim-paprsku/>
- [2] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd., Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- [3] GUMEX. *Řezání vodním paprskem* [online]. 2021 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzby/profily-a-vyroba-tesneni-75/rezani-vodnim-paprskem-46>
- [4] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi WJM*. 1. vyd., Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998, 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [5] MM VODNÍ PAPREK *Princip řezání vodním paprskem* [online]. 2021 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>
- [6] MM. Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů . *Tvoříme historii vodního paprsku* [online]. 2021 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tvorime-historii-vodniho-paprsku.html>
- [7] PÍŠKA, Miroslav. A KOLEKTIV. *Speciální technologie obrábění*. 1.vyd., Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [8] KOLB, Marcel. *Waterjet cutting: material processing with a high-pressure waterjet*. 1.vyd., München: Verlag moderne Industrie, 2006. ISDN-13: 978-3-937889-54-2
- [9] HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*, 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava – Poruba, 2007, 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [10] Abraziva. *Portál se specializací na tryskové a brusné materiály*. [online]. 2021 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://www.abraziva.cz/>
- [11] Technologické riešenia pestovania rastlín. *Čo znamená MESH*. [online]. 2021 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://www.profesionalservis.sk/sk/co-znamenam-mesh>
- [12] Wardjet. Tailored Waterjet Solutions. *Waterjet University: Nozzle and Orifice*. [online]. 2021 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://wardjet.com/waterjet/university/nozzle-orifice>
- [13] EN ISO 17658. *Welding – Imperfections in oxyfuel flame cuts, laser beam cuts and plasma cuts - Terminology*. Brussels: European committee for standardization, 2015.

- [14] PTV. *Cobra. Špičkový model nové generace stolů PTV*. [online]. 2021 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/cobra/>
- [15] SHAW, Milton.C.. *Principles of Abrasive Processing*. Oxford University Press Inc., Oxford , 1996, 592 s. ISBN-13: 978-0198590217
- [16] SSAB. *Materiálové listy Hardox 500*. [online]. 2021 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=D66A6185E91248CA8DAA978E4DA8C879&language=en>
- [17] KONAT, Łukasz. *Struktury i właściwości stali Hardox a ich możliwości aplikacyjne w warunkach zużywania ściernego i obciążeń dynamicznych*. Wrocław, 2007. 210 s. Disertační práce. Politechnika Wrocławska. Vedoucí práce: Dr hab. Ing. Włodzimierz Dudziński, prof. nadzw. PWr
- [18] Wardjet. Tailored Waterjet Solutions. *Waterjet University: Precision and Quality*. [online]. 2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://wardjet.com/waterjet/university/precision-quality>
- [19] PEREC, Andrzej. *Disintegration and recycling possibility of selected abrasives for water jet cutting*. DYNA, Universidad Nacional de Colombia, no.203, 2017, 84 s.[online]. 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/496/49655603032/html/index.html>
- [20] MOMBER, Andreas W., KOVACEVIC Radovan. *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. Springer-Verlag, London, 1998. 394s. ISBN: 978-1-4471-1574-8
- [21] ABRANOVA. Přírodní granát Mesh #80. [online]. 2021 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://abranova-eshop.cz/prirodni-granat-mesh-80-premium>
- [22] MOHAMED, Mostafa A.K.. *Waterjet Cutting up to 900 MPa*. Hannover, 2004. 122 s. Disertační práce. Universität Hannover. Vedoucí práce: Prof. Eduard Reithmeier
- [23] Fakulta strojní. Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. *Nekonvenční metody obrábění*. [online]. 2021 [cit. 2021-05-1]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/346/cs/o-katedre/novinky/detail-novinky/?reportId=39622&linkBack=%2F346%2Fcs%2Findex.html>
- [24] FILIP, Alexandru C., MIHAIL Laurentiu A., VASILONI Mircea A.. *An experimental study on the dimensional accuracy of holes made by abrasive waterjet machining of Hardox steels*. MATEC Web of Conference, EDP Sciences, no. 137, 2017, 10 s. [online]. 2021 [cit. 2021-05-1]. Dostupné z: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/51/mateconf_mtem2017_02003.pdf
- [25] HASHISH, Mohamed. Optimization Factors in Abrasive-Waterjet Machining. *Journal of Engineering for Industry*, New York, 1991, č.2, s. 29-37.

- [26] HASHISH, Mohamed. Pressure effects in abrasive-waterjet machining. *Journal of Engineering for Industry*, New York, 1989, č.2, s. 221-228.
- [27] MAROS, Zsolt. *Machining of different materials with abrasive waterjet cutting*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing, 2018, 448(1), 012009.
- [28] TICHÁ, Šárka a Jaromír ADAMEC. *Návody do cvičení z předmětu strojírenská metrologie*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008, 89 s. ISBN 978-80-248-1916-7.

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat mé vedoucí paní prof. Ing. et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D. za důležité rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat firmě PROMONT a.s. za zkušenosti s obsluhou a programováním vodního paprsku.

Na závěr bych rád poděkoval mé rodině za podporu v průběhu studia.

Přílohy

Příloha A

výkres řezané destičky